

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.011

基于最小二乘法的线路录波数据同步及故障测距

赵阳¹, 肖仕武¹, 焦邵麟², 刘玮²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510032)

摘要: 高压输电线路两侧故障录波装置由于自身时钟存在误差, 导致二者采集到的录波数据在时间上不同步, 利用该数据进行故障测距的结果精度较差, 无法为排除故障提供便利。为了充分利用故障录波数据, 需对两端录波数据进行同步处理。文中阐述了目前工程中采用的差流法、相位法和启动时刻对时法的原理及步骤, 对其各自的性能进行了对比分析, 在此基础上提出一种基于最小二乘法, 利用线路参数实现两端录波数据同步的方法, 并将其应用于故障测距。通过 PSCAD 仿真数据和实际故障录波数据的验证可知, 利用最小二乘法对故障录波数据进行同步后, 故障测距误差降低至 1%, 大大提升了结果的可靠性和可信性。

关键词: 时间同步; π 型等值电路; 故障录波; 最小二乘法; 故障测距

中图分类号: TM930; TM933

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)05-0078-07

0 引言

故障录波数据的时间同步对数据的高级应用具有重要意义。目前, 录波数据多应用于故障分析及运行状态评估, 后续的深层次应用包括故障测距及定位^[1]、线路参数辨识^[2-4]、故障诊断^[5-6]、继电保护装置动作分析^[7-8]及线路损耗计算。但由于线路两端故障录波装置的子时钟存在误差, 直接导致保信主站收集到的两端录波数据不同步, 影响了后续分析计算精度。对故障录波数据进行时间同步, 可使利用此数据进行电力系统分析得到的结果更可信。

故障测距的数据来源主要为同步相量测量装置(phasor measurement units, PMU)数据^[9-12]和故障录波数据^[13-17], 但 PMU 装置经济性较差, 而故障录波装置应用普遍, 包含丰富的故障暂态信息, 故多采用时间同步后的故障录波数据进行故障线路测距。目前, 工程上采用的故障录波数据同步方法为差流法、相位法和启动时刻对时法, 通过故障录波装置采集两端电气量数据, 结合线路参数以及历史数据和运行经验, 对两端电气量进行粗同步处理。文献[18—20]利用故障前电压电流数据, 实时修正不同步角及线路参数, 再利用故障后数据进行故障测距。但目前采用的故障录波数据同步方法依赖于运行人员的长期运行经验, 缺少理论依据, 往往同步后的数据质量仍不理想, 导致后续故障测距误差较大。

文中对工程采用的 3 种时间同步方法的原理及各自的局限性进行了阐述, 在此基础上提出了一种应用于保信系统, 基于最小二乘法的故障数据同步方法, 可结合线路参数以及两端电压电流数据, 在线路两端同步角未知的情况下实现两端数据同步。为验证该方法的有效性, 将处理后的数据用于故障测距, 对比故障距离计算误差可知, 对数据进行时间同步将有效提升后续分析精度。同时与工程中常用的同步方法进行对比, 采用实际线路数据进行仿真, 结果表明, 采用最小二乘法同步后的故障录波数据计算得到的故障距离误差最小, 结果可靠性大大提升。

1 工程用同步方法

目前, 运行人员对于首末两端不同步的电气量, 通常会结合线路参数, 采用相位法、差流法和启动时刻对时法对其进行简单同步, 以提高数据质量, 便于利用故障录波数据进行后续分析计算。

1.1 相位法基本原理及步骤

相位法是基于电力系统正常运行时的稳态数据, 根据稳态电流相量计算出线路两端的真实相角差, 再根据稳态电压相量计算得到实际相角差, 通过比较二者从而实现线路两端故障录波数据时间同步的方法。同步流程如图 1 所示, 具体步骤为:

(1) 根据两端稳态电流数据进行潮流计算, 得到两端真实电压相角差 $\Delta\theta$;

(2) 根据两端稳态电压数据进行傅里叶分解, 计算得到两端实际电压相角差 $\Delta\theta'$;

(3) 判断 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\theta'$ 是否相等, 若相等则说明两

收稿日期: 2020-04-19; 修回日期: 2020-05-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0101900)

端数据达到同步,否则须进行同步处理。

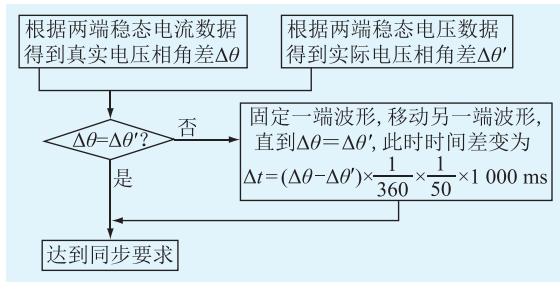


图1 相位法时间同步

Fig.1 Time synchronization based on phase

1.2 差流法基本原理及步骤

系统在正常运行状态下,线路首末两端安装的录波装置采集到电流相量,两端数据满足时间同步时内部差流应为0。差流法是通过移动波形,使正常工作时线路内部差流为0,实现首末两端录波数据时间同步的方法。同步流程如图2所示,具体步骤为:

(1) 根据稳态下两端电流相量 \dot{I}_M 和 \dot{I}_N , 计算得到差流 \dot{I}_k ;

(2) 判断差流 \dot{I}_k 是否为0,若满足则说明两端数据达到同步,否则须进行同步处理。

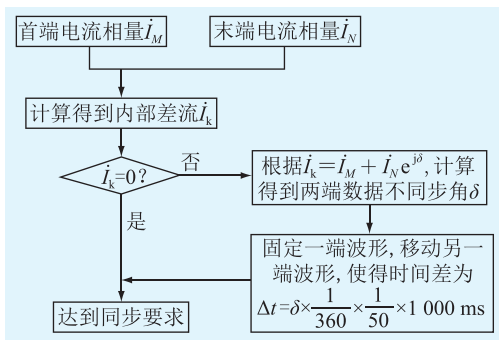


图2 差流法时间同步

Fig.2 Time synchronization based on differential current

1.3 启动时刻对时法基本原理及步骤

输电线路内部发生故障时,线路电气量会发生突变,线路两侧的故障录波装置会根据电气量的突变量,可靠启动,记录线路的故障数据。但是两侧变电站的子时钟存有误差,导致二者的启动时刻不一致,若以某一时间为基准选取故障数据进行分析,势必会产生不同步问题,给后续分析计算引入较大误差。同步流程如图3所示,具体步骤为:

(1) 找到两端故障录波装置开始采集故障波形的时刻;

(2) 以此为零点,向后选取40~60ms数据,此

时可保证数据窗内数据均为故障数据,且不存在不同步问题。

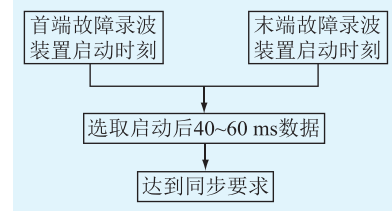


图3 启动时刻对时法时间同步

Fig.3 Time synchronization based on start time

1.4 同步方法对比分析

经过上述方法同步后的数据均应用于后续分析,同步后数据质量的好坏会对分析结果产生很大影响。因此从准确性和便捷性对上述方法的性能进行对比分析。

相位法需要采用线路参数进行系统潮流计算,受网络拓扑结构的限制,计算量较大,且线路参数会与给定参数存有误差,使潮流计算所得相角差存有误差,导致同步结果不理想。

差流法在进行时间同步时默认对地电容电流值影响很小,可忽略不计,但当输电线路长度较长或首末两端配备无功补偿装置(如并联高抗)时,会对内部差流计算产生影响,造成较大误差,导致不同步角计算不准确,同步效果不佳。

启动时刻对时法中,数据窗选取的实际为离散数据点,受到故障录波装置采样率的影响,需对理论数据点个数 n 进行取整处理,导致选取数据仍存在不同步角,同步效果不佳。

2 基于最小二乘法的时间同步方法

目前工程中常用同步方法受运行人员历史经验的影响较大,往往同步效果不佳,后续分析计算仍存在较大误差。随着通信和计算机技术的发展,人工智能技术已被广泛应用于电力系统数据的处理与分析。其中,最小二乘法可在真值未知的情况下,通过对误差平方和的限制,求得最优解。因此,文中采用最小二乘法对线路两端不同步角进行求解,实现两端故障录波数据的时间同步。

电力系统正常运行状态下,可简化为双端供电系统,如图4所示。文中采用 π 型线路模型,线路全长为 L ; 单位长度线路阻抗为 Z ; Z_M, Z_N 分别为双端系统两侧的系统阻抗; Y_C 为对地导纳; \dot{U}_M, \dot{I}_M 分别为首端电压、电流相量; \dot{U}_N, \dot{I}_N 分别为末端电压、电流相量; δ 为末端电气量相对于首端电气量的不同步角。

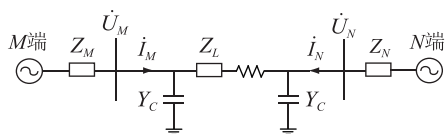


图4 双端供电网络集中参数示意图

Fig.4 Schematic diagram of double-side power supply network operation with lumped parameters model

根据基尔霍夫电流定律,考虑两端电气量的不同步角,可得:

$$\begin{cases} \dot{I}_N e^{j\delta} = (\dot{U}_N e^{j\delta} - \dot{U}_M) \frac{1}{ZL} + \dot{U}_N e^{j\delta} Y_C L \\ \dot{I}_M = (\dot{U}_M - \dot{U}_N e^{j\delta}) \frac{1}{ZL} + \dot{U}_M Y_C L \end{cases} \quad (1)$$

对首末两端数据进行整理,可得矩阵:

$$\begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_M}{ZL} \\ \frac{\dot{U}_M}{ZL} + \dot{U}_M Y_C L - \dot{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{U}_N}{ZL} + \dot{U}_N Y_C L - \dot{I}_N \\ \frac{\dot{U}_N}{ZL} \end{bmatrix} e^{j\delta} \quad (2)$$

即:

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \times \mathbf{x} \quad (3)$$

式中: \mathbf{A} 为首端电气量矩阵; \mathbf{B} 为末端电气量矩阵; \mathbf{x} 为两端电气量不同步角。由于在采集过程中,电压和电流数据的系统误差无法避免,因此引入误差矩阵 \mathbf{v} :

$$\mathbf{A} = \mathbf{B} \times \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (4)$$

由最小二乘法可知:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{A} \quad (5)$$

通过矩阵的计算可以得到矩阵 \mathbf{x} 。然后将矩阵 \mathbf{x} 作为已知量计算误差矩阵 \mathbf{v} ,可得:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} - \mathbf{B} \times \mathbf{x} \quad (6)$$

令矩阵 \mathbf{F} 为方差矩阵,即:

$$\mathbf{F} = \sum_1^n \mathbf{x}^2 \quad (7)$$

对初始矩阵 \mathbf{A} 进行修正:

$$\mathbf{A} = \mathbf{A} - \mathbf{v} \quad (8)$$

判断矩阵 \mathbf{F} 是否满足误差要求,若未达到,通过式(8)得到新的电流矩阵 \mathbf{A} ,重复上述过程,直到矩阵 \mathbf{F} 满足要求为止。

对于分布参数输电线路模型,其两端故障录波数据仍可采用文中方法进行同步处理。图5为双端输电线路的分布参数模型,线路全长为 l ;单位长度阻抗为 Z_0 ;单位长度导纳为 Y_0 ;两端母线同步前电压、电流分别为 $\dot{U}_M, \dot{U}_N, \dot{I}_M, \dot{I}_N$;线路传播常数为 γ ,波阻抗为 Z_C ,其中 $\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}$, $Z_C = \sqrt{Z_0 / Y_0}$ 。

假设首末两端电气量的不同步角为 δ 。

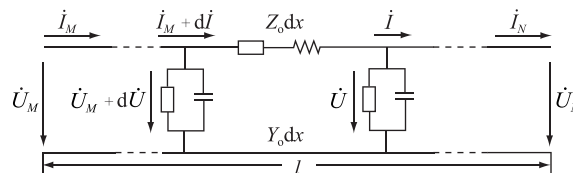


图5 双端供电网络分布参数示意图

Fig.5 Schematic diagram of double-side power supply network operation with distributed parameters model

根据均匀传输线方程,在考虑不同步角的情况下,两端电气量可表示为:

$$\begin{cases} \dot{I}_N e^{j\delta} = \dot{I}_M \text{ch}(\gamma l) - \frac{1}{Z_C} \dot{U}_M \text{sh}(\gamma l) \\ \dot{I}_M = \dot{I}_N e^{j\delta} \text{ch}(\gamma l) - \frac{1}{Z_C} \dot{U}_N e^{j\delta} \text{sh}(\gamma l) \end{cases} \quad (9)$$

整理为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_M \text{ch}(\gamma l) - \frac{1}{Z_C} \dot{U}_M \text{sh}(\gamma l) \\ \dot{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_N \\ \dot{I}_N \text{ch}(\gamma l) - \frac{1}{Z_C} \dot{U}_N \text{sh}(\gamma l) \end{bmatrix} e^{j\delta} \quad (10)$$

重复上述式(4)一式(8),即可采用最小二乘法实现分布参数模型下的输电线路故障录波数据时间同步。

文中提出的基于最小二乘法的时间同步方法仅采用了故障线路参数,不会受到网络拓扑结构的影响,便于运行人员进行调试维护,具有很高的准确性与便捷性。同时可利用最小二乘法对不同步角初值不断迭代,快速得到最优解,提高数据质量。其流程如图6所示。

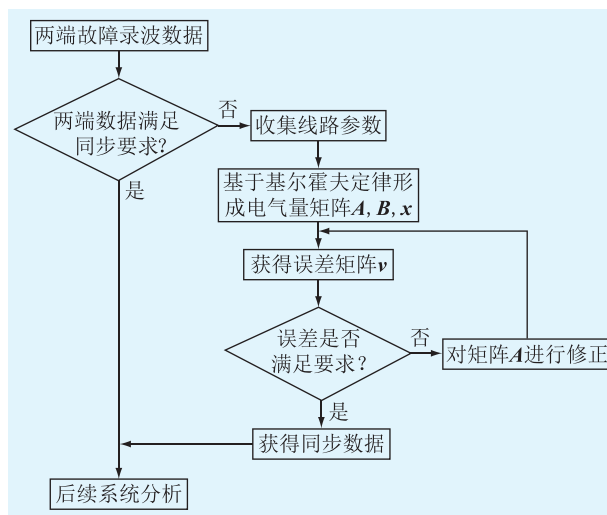


图6 基于最小二乘法的时间同步

Fig.6 Time synchronization of recording data based on least squares

3 基于双端时间同步数据的故障测距算法

目前输电线路故障距离测量包括行波法、微分方程法和工频量测距法。综合经济性和可靠性,工频量测距法算法简单、计算量较小,同时其获取故障距离的过程无需增加额外的硬件投资,故被广泛应用。采用双端工频电气量准确获取输电线路故障距离,可帮助运行维护人员在故障发生后快速准确定位故障位置,大大缩短恢复运行的时间,提高电力系统运行的可靠性。

根据电力系统双端网络运行示意图,可得如图7所示的双端输电线路。线路长度为 l ,单位长度线路阻抗为 Z ,距离首端 M 端 d 处发生故障接地,过渡电阻值为 R_f ,考虑对地电容的影响。

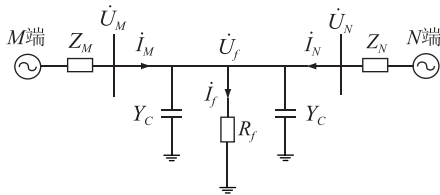


图7 双端输电线路集中示意

Fig.7 Schematic diagram of double-side line lumped parameters model

图中 \dot{U}_f , \dot{I}_f 分别为故障点处电压、电流值。对图中电气量进行同步处理后,得到两端电压、电流分别为 \dot{U}'_M , \dot{U}'_N , \dot{I}'_M , \dot{I}'_N , \dot{U}'_f , \dot{I}'_f 。

采用同步后线路两端的电压电流,根据图7可得下式:

$$\begin{cases} \dot{U}'_M = (\dot{I}'_M + \dot{U}'_M Y_C) dZ + \dot{I}'_f R_f \\ \dot{U}'_N = (\dot{I}'_N + \dot{U}'_N Y_C) (l-d)Z + \dot{I}'_f R_f \end{cases} \quad (11)$$

消去式中的 \dot{I}'_f , R_f ,可得:

$$d = \frac{\dot{U}'_M - \dot{U}'_N + (\dot{I}'_N + \dot{U}'_N Y_C) lZ}{(\dot{I}'_M + \dot{I}'_N + \dot{U}'_M Y_C + \dot{U}'_N Y_C) Z} \quad (12)$$

由此,采用线路两端电压电流计算得到故障距离,在推导过程中消除过渡电阻值及过渡电阻性质对计算结果的影响。

目前,电力系统对于故障距离计算结果的衡量标准主要从准确性出发,包括相对误差和绝对误差两方面。根据国网公司《全国电力调度系统“十五”科技发展规划纲要》,要求故障距离计算结果与实际故障距离误差应在1%以内。

4 算例仿真及性能对比

4.1 PSCAD 仿真

以短距离高压双端供电系统为例,在PSCAD/

EMTDC平台建立图8所示的220 kV输电线路模型,线路采用 π 型线路等值模型,考虑了对地分布电容。其中输电线路长度为80 km,正序阻抗 Z_1 和负序阻抗 Z_2 均为 $0.11 + j0.382 \Omega$,零序阻抗 Z_0 为 $0.47 + j1.1 \Omega$ 。运行0.1 s时,设置A相单相经过渡电阻接地故障,故障点距离M端50 km,持续50 ms,同时设置在N端录波装置1 ms的延时,即不同步角为 18° 。故障录波装置的采样频率为2 000 Hz。

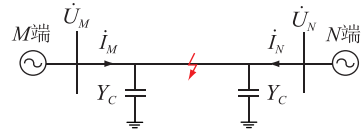
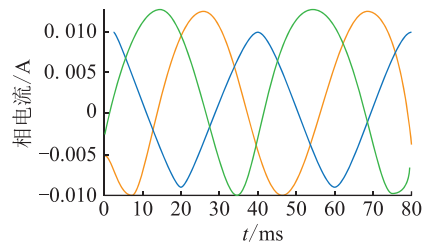


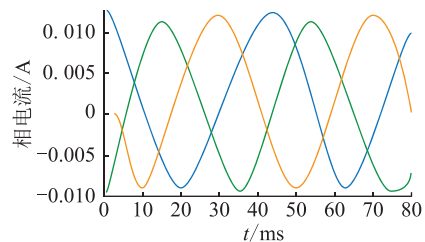
图8 220 kV双端供电系统线路模型

Fig.8 220 kV double-side power supply system line model

故障发生后录波波形如图9所示,可以看出,首末两端电流波形存在明显相角差。



(a) M侧相电流



(b) N侧相电流

图9 故障电流波形

Fig.9 Fault recording current waveform

采用上述数据,通过式(12)计算得到故障距离为90.69 km,与实际故障距离误差为50.86%,不符合规程要求。接着采用相位法、差流法、启动时刻对时法和最小二乘法对故障录波数据进行同步处理,计算结果如表1所示。

表1 计算结果

Table 1 Calculation results

同步方法	不同步角/($^\circ$)	误差/%	故障距离/km	E_d /%
相位法	19.065 0	5.9	55.68	7.10
差流法	18.765 0	3.0	52.66	3.33
启动时刻对时法	21.523 3	19.56	69.05	23.81
最小二乘法	17.865 2	0.74	50.56	0.70

定义测距误差为:

$$E_d = \frac{|\text{故障距离计算值} - \text{故障距离实际值}|}{\text{输电线路总长}} \times 100\% \quad (13)$$

由表 1 可以看出,录波数据经过最小二乘法同步后,计算得到不同步角与实际不同步角误差较小,以此角度对两端电气量进行同步更加准确。因此,采用文中方法对故障录波数据进行时间同步,可大大提高数据质量以及后续计算精度。

4.2 实际故障数据计算

选取某地区输电线路的实际故障录波数据作为研究对象,线路全长 59.645 km,正序阻抗和负序阻抗为 $Z_1 = Z_2 = 2.244\ 547 + j17.911\ 941\ \Omega$,零序阻抗为 $Z_0 = 13.164\ 689 + j43.846\ 16\ \Omega$,在距离首端 4.136 km 处发生 B 相单相接地故障。首端故障录波装置启动故障录波时刻为 10:56:01,末端故障录波装置启动故障录波时刻为 10:56:07,首末两端故障录波装置采样率均为 5 000 Hz。

两端电流电压波形如图 10 所示,可以看出,该线路两端故障录波数据存在不同步问题。分别采用已有的 3 种同步方法及文中所提方法对两端数据进行时间同步处理。

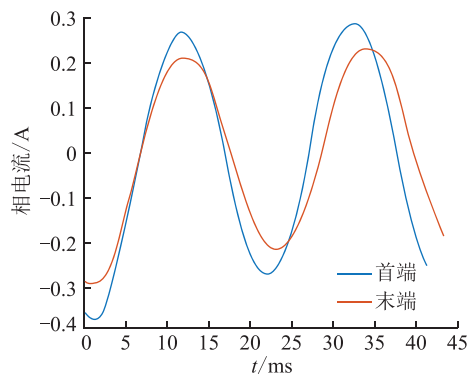


图 10 故障相电流波形

Fig.10 Fault phase current waveform

由于实际故障录波数据首末两端的真实不同步角无法获取,因此将根据式(12)计算得到的故障距离误差作为评判标准。计算结果如表 2 所示。

表 2 计算结果

Table 2 Calculation results

方法	故障距离/km	$E_d/\%$
相位法	5.376	2.08
差流法	5.035	1.51
启动时刻对时法	6.226	3.51
最小二乘法	4.671	0.89

由表 2 可知,采用最小二乘法对 220 kV 输电

路故障录波数据进行时间同步处理,可以有效地提高数据质量,降低故障距离计算误差,满足测距要求。

5 结语

文中提出了一种基于最小二乘法的高压输电线路故障录波数据时间同步方法,将同步后的数据应用于故障距离计算,可明显缩小计算结果误差。与目前工程上常用的 3 种同步方法相比,采用最小二乘法对故障录波数据进行时间同步,对数据的优化性能更佳,故障测距结果误差可由 50.86%降低到 1%之内,大大提升了结果的可信度和可靠性。同步后数据可应用于电力系统分析和故障诊断,为运行人员准确把握系统运行状态、故障后迅速排除故障及快速恢复供电提供指导。

值得注意的是,文中方法在分析过程中未考虑线路两端安装的互感器对线路故障录波数据同步的影响,这也是下一阶段的研究方向。

本文得到广东电网有限责任公司科技项目“基于故障录波信息的电网故障快速诊断技术研究及高级功能应用”(GDKJXM20162205)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 马杰,李磊,李乃永,等. 基于故障信息的高阻接地故障辨识与定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(11):74-78. MA Jie,LI Lei,LI Naiyong,et al. High resistance ground fault identification and location method based on fault information[J]. Power System Protection and Control,2013,41(11):74-78.

[2] 李静,丁蓝,张淦水. 基于故障录波数据的输电线路参数辨识[J]. 电工技术,2018,475(13):22-23. LI Jing,DING Lan,ZHANG Ganshui. Parameter identification of transmission lines based on fault recording data[J]. Electrical Engineering,2018,475(13):22-23.

[3] 韦恒,周岷,王毅. 基于故障录波装置的双回输电线路参数在线测量方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):138-142. WEI Heng,ZHOU Yi,WANG Yi. On-line measurement method of parameters of double-circuit transmission line based on fault recording device[J]. Power System Protection and Control,2011,39(23):138-142.

[4] 梁振锋,张晓阳,张惠智,等. 基于故障录波数据的故障线路参数计算[J]. 智慧电力,2018,46(8):39-44. LIANG Zhenfeng,ZHANG Xiaoyang,ZHANG Huizhi,et al. Calculation of fault line parameters based on fault recording data[J]. Smart Electric Power,2018,46(8):39-44.

[5] 吴昊,全玉生,房林杰,等. 基于录波数据的输电线路故障诊断方法[J]. 广东电力,2015,28(12):1-5,12. WU Hao,QUAN Yusheng,FANG Linjie,et al. Transmission line

- fault diagnosis method based on recorded data[J]. *Guangdong Electric Power*, 2015, 28(12):1-5, 12.
- [6] 韩迎春,童晓阳. 利用时空电气量基于灰色关联度的电网故障诊断[J]. *电网技术*, 2017, 41(2):252-259.
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. Fault diagnosis of power grid based on grey correlation based on space-time electricity[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(2):252-259.
- [7] 刘坚. 故障录波数据的继电保护动作特性分析[J]. *低碳世界*, 2016(35):98-99.
LIU Jian. Analysis of relay protection operation characteristics of fault record data[J]. *Low Carbon World*, 2016(35):98-99.
- [8] 杨娟. 10 kV 电力线路故障继电保护与自动装置动作分析[J]. *电子世界*, 2013(16):30-31.
YANG Juan. Analysis of 10 kV power line fault relay protection and automatic device actions[J]. *Electronics World*, 2013(16):30-31.
- [9] 靳夏宁,汪美平,王赞基,等. 基于 PMU 动态同步相量测量的故障测距[J]. *电网技术*, 2013, 37(10):2932-2937.
JIN Xianing, WANG Fuping, WANG Zanji, et al. Fault location based on PMU dynamic synchronous phasor measurement[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(10):2932-2937.
- [10] 胡正轩,姜宏达,李金玲,等. 基于 PMU 的三端高压输电系统故障测距算法[J]. *自动化技术与应用*, 2013(2):62-65, 72.
HU Zhengxuan, JIANG Hongda, LI Jinling, et al. Fault location algorithm for three-terminal high-voltage transmission system based on PMU[J]. *Automation Technology and Applications*, 2013(2):62-65, 72.
- [11] 王小君,任欣玉,和敬涵,等. 基于 μ PMU 相量信息的配电网故障测距方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(3):67-75.
WANG Xiaojun, REN Xinyu, HE Jinghan, et al. Fault location method for distribution network based on μ PMU phasor information[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(3):67-75.
- [12] 周治国,高文焘,刘文亮. 基于 μ PMU 的主动配电网故障定位方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(3):76-81.
ZHOU Zhiguo, GAO Wentao, LIU Wenliang. Research on fault location method of active distribution network based on μ PMU[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(3):76-81.
- [13] 赵自刚,郝玉山,曹树江,等. 由故障录波辨识故障线路的全参数和故障定位[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018(7):146-150.
ZHAO Zigang, HAO Yushan, CAO Shujiang, et al. Full parameters and fault location identification of faulty line by fault recorder[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018(7):146-150.
- [14] 许飞,董新洲,王宾,等. 新型输电线路单端电气量组合故障测距方法及其试验研究[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4):37-42.
XU Fei, DONG Xinzhou, WANG Bin, et al. New single-ended electrical quantity combined fault location method for new transmission lines and its experimental study[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4):37-42.
- [15] 李磊,李凤霞,邵玉槐,等. 基于故障录波数据的双端测距算法软件的实现[J]. *华东电力*, 2011(2):161-164.
LI Lei, LI Fengxia, SHAO Yuhuai, et al. Implementation of double-end ranging algorithm software based on fault recording data[J]. *East China Electric Power*, 2011(2):161-164.
- [16] 罗毅,田吉华. 基于双端数据和算法融合的输电线路故障测距新方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(12):1-6.
LUO Yi, TIAN Jihua. Transmission line fault location method based on double-ended data and algorithm-fusion[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(12):1-6.
- [17] 王丰华,穆卡,张君,等. 基于参数修正的输电线路双端不同步测距方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(8):102-108.
WANG Fenghua, MU Ka, ZHANG Jun, et al. Asynchronous distance measurement method for double-ended transmission lines based on parameter modification[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(8):102-108.
- [18] 高厚磊,陈学伟,刘洪正,等. 基于改进参数检测法的双端非同步数据故障测距算法[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(9):27-32.
GAO Houlei, CHEN Xuewei, LIU Hongzheng, et al. Fault detection algorithm of double-end asynchronous data based on improved parameter detection method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(9):27-32.
- [19] 吴浩然,李澄. 采用不同步数据的故障测距新原理研究[J]. *江苏电机工程*, 2016(6):73-76.
WU Haoran, LI Cheng. Research on novel fault location principle with asynchronous data[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2016(6):73-76.
- [20] 林梅芬. 一种基于非同步采样的双端测距方法[J]. *电工技术*, 2019(11):40-43.
LIN Meifen. A two-terminal fault location method based on asynchronous sampling[J]. *Electrical Technology*, 2019(11):40-43.

作者简介:



赵阳

赵阳(1995),男,硕士在读,研究方向为输电线路故障诊断(E-mail: 1054223669@qq.com);

肖仕武(1974),男,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统次/超同步振荡机理及抑制、新能源电力系统故障分析与继电保护;

焦邵麟(1977),男,硕士,高级工程师,从事电力系统故障分析与继电保护工作。

Synchronization of line fault recording data and fault location based on least square method

ZHAO Yang¹, XIAO Shiwu¹, JIAO Shaolin², LIU Wei²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

2. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510032, China)

Abstract: The fault recording data collected by the devices of both sides of transmission line, owing to the error in the sub clock, is asynchronous. The results of subsequent analysis based on the unprocessed fault recording data, especially the fault location, can not meet the requirement of accuracy, especially the fault location, failing to provide guidance for fault resolution. To make full use of fault recording data, time synchronization of recording data is very necessary. Firstly, three methods currently commonly used in engineering are shown, at the same time, the principle and limitations of every method are discussed. Secondly, the transmission line with lumped parameters model is established, a method based on least squares, using the parameters and recording data of the transmission, is proposed. Finally, the simulative results demonstrate that the time synchronization method based on least squares can achieve high accuracy in fault location, and improve reliability of subsequent analysis results.

Keywords: time synchronization; π type equivalent circuit; fault recording data; the least squares method; fault location

(编辑 方晶)

(上接第 77 页)

Review on the policies and compensation mechanism of BESS participation in the auxiliary service of frequency and peak modulation

ZHANG Zhi¹, SHAO Yinchi^{2,3}, LUN Tao¹, ZHOU Ji¹

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Research Institute(North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China; 3. Grid-connected Operation Technology for Wind-Solar-Storage Hybrid System State Grid Corporation Key Laboratory, Beijing 100045, China)

Abstract: With numerous policies of energy storage participating in the peak and frequency modulation service been released, it is necessary to make clear analysis about those policies. Firstly policies and cases of battery energy storage system(BESS) participating in the auxiliary service of peak and frequency modulation are summarized from the national, regional and provincial sides, combined with the frequency and peak modulation characteristics of BESS. The admittance requirement, compensation price and trading mode in typical provinces are summarized. Then, the compensation mechanism for BESS participating in frequency modulation service in the United States and Europe, as well as two compensation mechanisms in China are discussed, and the modes and mechanism of BESS participating in peak modulation in China are summarized, taking Qinghai province as an example. Finally, the existing problems of BESS participating in peak and frequency modulation under the existing policies are briefly analyzed. Suggestions related to those problems are put forward from the aspects of differential compensation, optimal allocation of frequency modulation resources, the mechanism of energy storage sharing and evaluation standard.

Keywords: battery energy storage system(BESS); frequency modulation; peak modulation; electric auxiliary services; compensation mechanism

(编辑 钱悦)